

Simulation und Optimierung von additiv gefertigter Keramik

M. Witscher, M. Lüke, D. Nikolay, W. Kollenberg

WZR ceramic solutions GmbH

m.witscher@wzr.cc

W. Hoffmann, R. Wulfert

sico-solutions wissenschaftliche und technische Lösungen

wolfgang.hoffmann@sico-solutions.de

Abstract

Das Potential der Additiven Fertigung, das durch geometrische Freiheiten der Gestaltung gegeben ist, wird bisher häufig nur unter Design Aspekten genutzt. Zur Konstruktion keramischer Bauteile sind viele Heuristiken und Richtlinien vorhanden, es mangelt jedoch an einer analytischen Herangehensweise und Vergleichskriterien. Die gezielte Reduzierung der Masse, ohne Einbuße des Einsatzverhaltens, ist für Keramik kommerziell noch nicht umgesetzt. Auf Grundlage einer Anpassung für Bauteile aus Stahl wurde daher eine anwendungsspezifische Topologieoptimierung keramischer Bauteile entwickelt, um das Potential des 3D-Drucks für keramische Komponenten konsequent zu nutzen. Als besondere Herausforderung galt es, die beim Sinterprozess auftretenden Schwindungen zu berücksichtigen und die richtungsabhängigen Materialeigenschaften gedruckter Keramik zu berücksichtigen. Beispielsweise müssen, um Risse zu vermeiden, große Masseunterschiede innerhalb eines Bauteils vermieden werden und trotzdem eine Gewichts- und Größenreduktion erreicht werden. Das anwendungsoptimierte Bauteil wurde in einem zweiten Schritt ein weiteres Mal topologieoptimiert, diesmal mit einem fertigungsspezifischen Bezug. Insbesondere beachtet wurden die Vorgänge beim Sintern.

Da zu diesem Vorgang noch keine Standardmodellierung vorlag, werden eine Modellierung und ein numerisches Berechnungsverfahren entwickelt. Hierzu wurden physikalische Tests wie Biegeprüfungen und E-Modulbestimmungen und Ermittlungen der Oberflächenrauigkeit durchgeführt und in die Simulation eingepflegt.

Ziel der Topologieoptimierung sind die Reduktion von Spannungen im Bauteil und die Wahrung der Form nach dem Sintern. Das Ergebnis der Topologieoptimierung ist nicht das fertige Bauteil, sondern der zu druckende Grünling.

1 Vorbetrachtungen und Vorversuche

Im Rahmen des ZIM Forschungsprojekts KeraTop wurde die Entwicklung einer Simulationstechnologie angegangen, die vorhersagt, wie ein Grünkörper gefertigt sein muss, um als Endprodukt einen Körper zu erhalten, welcher sowohl die bestmöglichen mechanischen Eigenschaften, als auch die möglichste exakte Form ausweist. Dazu wurde nach diversen Vorversuchen mit verschiedenen Systemen wie Cordierit, Mullit, Aluminiumoxid und Zirkoniumoxid als einziges Al_2O_3 ausgewählt. Allerdings wird dabei noch in 92% Al_2O_3 und in 99% Al_2O_3 unterschieden. Dies geschah aufgrund der hohen Verbreitung und der breiten industriellen Anwendung als z.B. Brennhilfsmittel, Verschleißschutz, Kühlkörper oder Werkzeugmaterial in der Umformtechnik. Im ersten Schritt wurden hier bestimmte Körper definiert, die über das 3-D Druckverfahren „Binder Jetting“ für das Material hergestellt werden sollten. Hierbei spielt der jeweilige Einsatzzweck für die Probekörper die bestimmende Rolle. Daher sollten mehrere Eigenschaften wie , Rohdichte, offene Porosität, Biegefestigkeit, Schrumpfung, Temperaturwechselbeständigkeit (TWB), mechanische Bruchfestigkeit (Falltest), Heißbiegefestigkeit etc. getestet werden.

Im Verfahren des „Binder Jetting“ (früher allg. „3D-Druck oder pulverbettbasierter 3D-Druck; [1-4]) wird eine Lage Pulver ausgelegt und mit einer Flüssigkeit benetzt. Diese verklebt die Partikel innerhalb der Lage sowie zwischen den Lagen, wodurch Lage für Lage ein Bauteil aufgebaut wird. Das lose Pulver wird nach Trocknung des Klebers entfernt und das Bauteil konventionell gesintert.

Da für dieses 3D-Druckverfahren verschiedene Parameter für die gute Verdruckbarkeit, wie gute Schichtlegung, gutes Fließverhalten, eine geeignete Partikelgröße und gute Packungsdichte erfüllt sein müssen, wurde im Vorfeld eine Materialentwicklung erforderlich, damit die Probekörper hergestellt werden konnten, um die jeweiligen Versuche und Optimierungen durchführen zu können. Hierzu wurden insgesamt 23 Mischungen aus verschiedenen Rohstoffen und Bindern ausführlich charakterisiert und bewertet. Dazu wurde das Weibull- Modul verschiedener Mischungen bestimmt, die als weitere Grundannahmen für die Simulation [5-9] dienten. Durch diverse Iterationsschritte konnten im Weiteren (ohne jegliche Simulation) die Korngrößenverteilung und damit Packungsdichte und Verarbeitbarkeit (Hausner-Zahl) verbessert werden, als auch die Festigkeit signifikant gesteigert werden.

2 Simulation der mechanischen und thermischen Last von Bauteilen, Topologieoptimierung

Es kam parallel zu den physikalischen Tests eine Simulation der Werkstoffe zum Einsatz, indem die Form auf die jeweilige Belastung simuliert wurde. Beispielhaft dienten hier Brennhilfsmittel als weitverbreitete Anwendung dieses Werkstoffs. Es sollte eine Erhaltung der Funktion (hier wichtigster Parameter: Festigkeit) erreicht werden und dabei der Materialeinsatz reduziert werden um in der Produktion Zeit und Kosten einsparen zu können und vor allem im Einsatz durch geringeres Gewicht weniger Masse aufheizen zu müssen, was wiederum die Brennkosten deutlich senkt. Es wurde für die Topologieoptimierung ein konventionelles Verfahren (SIMP: Solid Isostatic Material with Penalization) gewählt. Dabei kann unter Beachtung fertigungstechnischer Grenzen des Binder Jettings, wie Wandstärke, das Material bis auf ein Minimum unter Einhaltung der Festigkeitsgrenzen reduziert werden, sodass die Form verändert aber die Funktion weitestgehend erhalten bleibt (*Abb. 1* und *Abb. 2*). Hierbei wurden verschiedene Modelle zur Optimierung der Topologie an 99er Al_2O_3 angewandt (siehe *Tab. 1*).

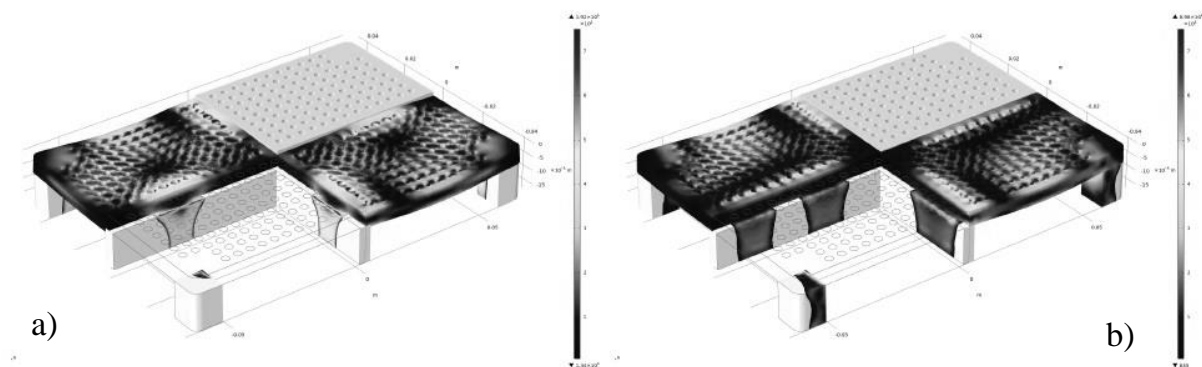


Abb. 1: Volumenmodell (Mises-Stress-Karte der Deformation unter definierter Last) nach Optimierung des Materialvolumens um $\Phi = 0,2$ (a) und $\Phi = 0,5$ (b). Der ursprüngliche Bauraum ist grau schattiert. Die elastische Deformation durch Flächenlast ist stark überhöht dargestellt. Die hellgrauen Bereiche auf den deformierten Lochplatten kennzeichnen Bereiche mit hoher Spannung.

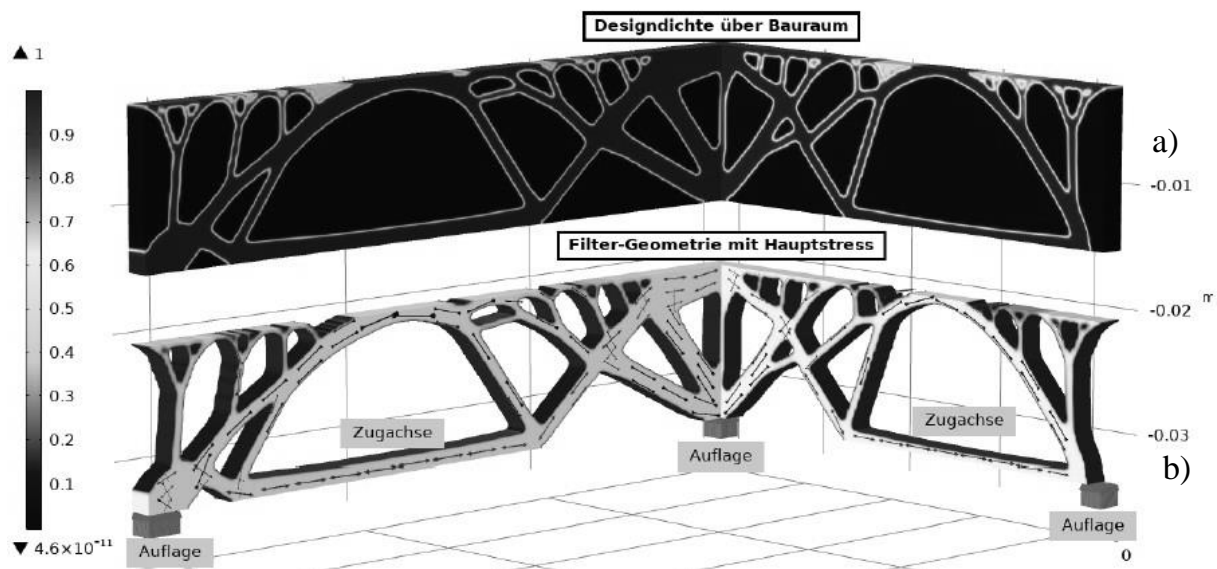


Abb. 2: Optimierter Sockel unter Flächenlast mit um $\Phi = 0,25$ reduziertem Material. Die Simulation gibt die neue Geometrie gegenüber einem konventionellen vollen Biegeriegel aus (a). Zug - und Druckachsen sind unten dargestellt (b).

Diese Optimierungen wurden im Labor nachvollzogen und den entsprechenden Biegeprüfungen unterzogen. Es ergab sich bei einem Materialeinsatz (Volumenanteil Φ) von 50% eine „Restfestigkeit“ von ca. 67% (Modell CeraShape Iteration2; Tab. 1).

Tab. 1: Vergleich der optimierten Körper auf Kaltbiegefestigkeiten im Vergleich zum massiven Standardriegel

Modell	KBF [MPa]	Weibull-Modul
Standardriegel massiv	23,3	9,2
Modell „SIMP“	13,7	18,5
Modell „CeraShape“	12,7	9,1
Modell „CeraShape Iteration2“	15,6	10,8

3 Simulation des Sinterverhaltens

Nachdem die Optimierung der Topologie einen guten und nachweisbar fundierten Stand aufwies konnte der zweite Schritt, das Sintern optimiert werden, wofür die Daten der vorherigen Simulationen, wie Verhalten unter Temperatur und Last, unentbehrlich sind.

Hierzu wurden abermals die Systeme als Prototypen für Feststoffsinterung (also 99 % Al_2O_3) und Flüssigphasensinterung (92% Al_2O_3) unterschieden. Treibende Kräfte für diese Sintervorgänge sind die Minimierung der Grenz- und Oberflächenenergien, Kapillarkräfte und chemische Reaktionspotentiale, sodass ein energetisches Minimum erreicht werden kann. Nebeneffekt dieser Vorgänge ist eine Verfestigung des Körpers, eine Tendenz zur Porenverkleinerung und Verdichtung des Gefüges. Hierzu wurden erneut verschiedene Mischungen getestet und die Korngrößenverteilung, sowie der pyroplastische Index (Tab. 2), also die Durchbiegung beim Sintern, näher in den Fokus gerückt und bestimmt. Es wurde eine optimale Mahldauer für einzelne Rohstoffe ermittelt um eine dichte Schüttung und verbesserte Schichtlegung zu erhalten.

Tab. 2: pyroplastischer Index des 92er Al_2O_3

Brenntemperatur [°C]	Pyroplastischer Index [10^{-6} mm^{-1}]
gering	11
	29
	36
	40
	41
	42
	47
hoch	63

Hierbei kam ein 2-D Simulationsmodell zum Einsatz, dass mit den gegebenen Daten die Durchbiegung verschiedener Mischungen vorhersagen und über Korrekturen der Geometrie kompensieren sollte. Dazu wird nun das einzelne Verhalten im Körper selbst betrachtet. Das Gefüge und dessen Bestandteile sollen adäquat simuliert werden können. Die Probekörper müssen also anders gefertigt werden, damit diese die finale Endform erreichen können und die gewünschten Werkstoffkennndaten erreichen können, um die beobachteten Biegungen, Verzug oder Schrumpfung zu kompensieren.

Hierzu kam ein Modell nach Skorohod und Olevsky (SOVS) [10] mit einer Erweiterung nach Safonov [11] zum Einsatz. Da Keramik unter Last elastisch reagiert, bis der Bruch auftritt und aufgrund hoher Steifigkeiten unter normalen Belastungen kaum Deformationen zu erwarten sind, müssen diese Werkstoffeigenschaften, sowie dessen Verhalten unter höherem Druck und Temperatur im Modell Berücksichtigung finden. Mit dem entwickelten Modell konnten die viskosen Kriechvorgänge unter Temperatureinfluss sowie die Verfestigung und die Schrumpfung des Volumens erst in einem 2D, später in einem 3D-Modell berechnet werden. Durch diese Integration des Modells in das Programm COMSOL Multiphysics® wird auch die pyroplastische Verformung unter Eigenlast bis zum Bruch möglich. Durch die Erweiterung erhält man dazu noch Aussagen über den Schrumpfvorgang, der allgemein mehr Informationen zugänglich werden lässt und neue Parameter wie Viskosität, Oberflächenenergie, Sinterspannung, Dichte, Porosität und Korngröße besser abschätzbar macht. Durch Kalibrierung und Optimierung des Modells wird so ein Gewinn für zukünftige Simulationen erreicht. Diese Validierungstests im Labor wurden an Biegeriegeln (2D) und Brennhilfsmitteln (3D) verschiedener Geometrien durchgeführt. Hierzu wurden negativ gebogene Riegel mittels Binder Jetting gedruckt (konkav gekrümmt) und Brennhilfsmittel dem normalen Sintervorgang bis 1600 °C ausgesetzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 3 und Abb. 4 zu sehen. Der Riegel ist nahezu verzugsfrei gebrannt worden, die Brennhilfsmittel komplexerer Geometrie konnten ebenfalls zufriedenstellend vorhergesagt werden.

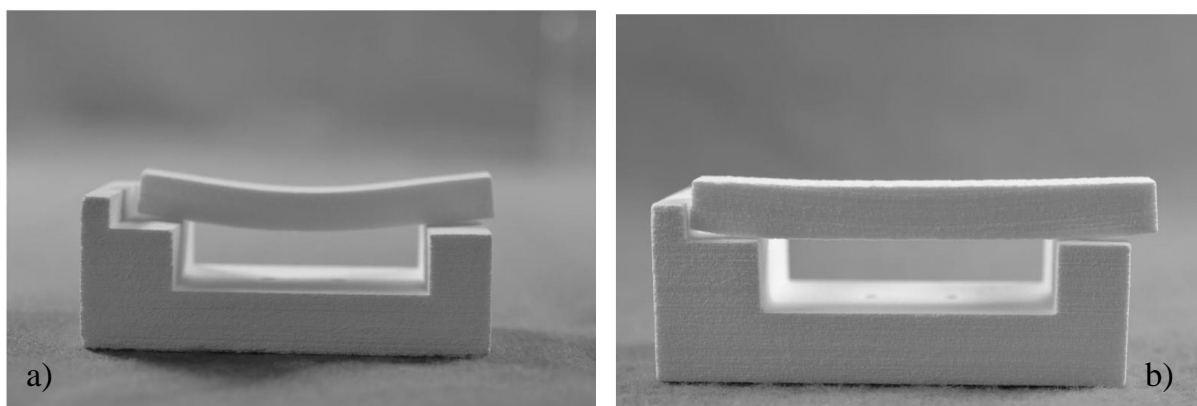


Abb. 3: normaler Biegeriegel aus 92er Al_2O_3 nach dem Sintern bei 1400 °C (a); vorab simulierter Riegel nach dem Sintern bei gleicher Temperatur (b)

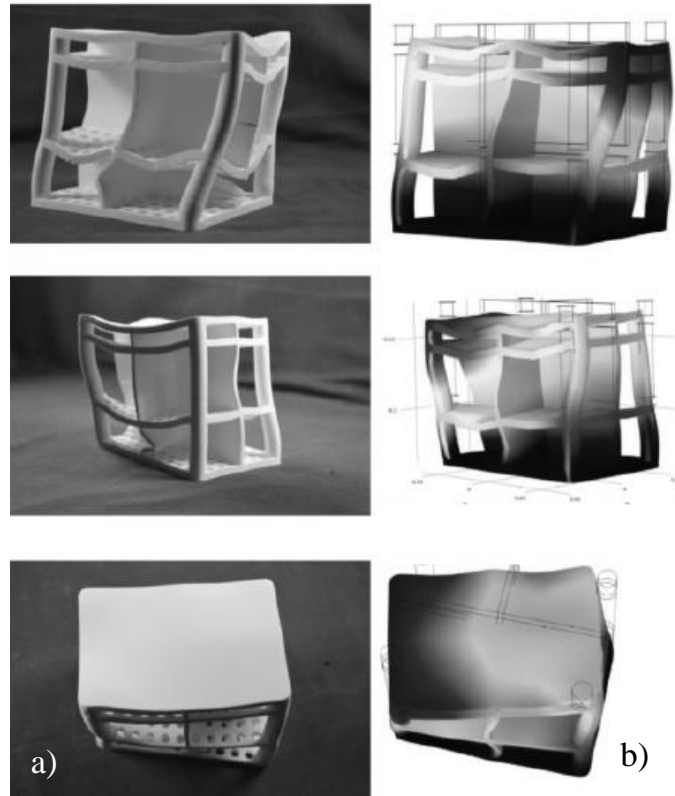


Abb. 3: Validierung mittels eines Brennhilfsmittels: der simulierte Verzug (b) ist gut am realen Modell erkennbar (a). Es kam wie vorhergesagt zu starken Verzerrungen bis hin zum Bruch. Dunkle Bereiche (b) kennzeichnen starke Spannungen.

4 Fazit

Abschließend kann gesagt werden, dass über die Simulation und Laborversuche das gesteckte Ziel erreicht wurde. Mittels eines Modells ist es gelungen die Werkstoffeigenschaften zu simulieren, diese zu validieren und unter Materialeinsparung eine annähernd gleiche Festigkeit zu erreichen. Der günstigste Punkt für das Verhältnis von Einsparung zu Festigkeit lag bei 50% Materialeinsparung bei gleichzeitigem Erhalt von 67% der ursprünglichen Festigkeit. Die Vorgänge im Material konnten simuliert und die Daten von Biegeriegeln so genutzt werden, dass die Deformation kompensiert wurde. Als Ergebnis gingen diese Riegel gerade aus dem Sintervorgang hervor.

Literatur

- [1] DIN e.V., DIN EN ISO 52900, Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie, Beuth-Verlag, 2017-06
- [2] Ziaee, M., Crane, N. B., Binder jetting: A review of process, materials, and methods, Addit. Manuf. 28 (2019)
- [3] Du, W., Ren, X., Ma, C., Pei, Z., Binder Jetting Additive Manufacturing of Ceramics: A Literature Review, Vol. 14 Emerg. Technol. Mater. Genet. to Struct. Saf. Eng. Risk Anal., American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [4] Kollenberg, W., Additive Fertigung keramischer Komponenten, 1. Aufl., Vulkan Verlag, 2020
- [5] Weibull, W., A Statistical Theory of the Strength of Materials. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, 1939
- [6] Cohrt, H., Grathwohl, G., Festigkeit keramischer Hochtemperaturwerkstoffe, Metallische und Nichtmetallische Werkstoffe und ihre Verarbeitungsverfahren im Vergleich. Teil IV. Hochtemperaturverhalten ; Tagung Koeln, 24. und 25. November 1987 Duesseldorf : VDI-Verl., 1987, VDI-Berichte ; 600.4, 1987, S. 137–75
- [7] Härtelt, M., Probabilistische Lebensdauervorhersage fuer keramische Bauteile unter komplexer zyklischer Beanspruchung, Dissertation. KIT Karlsruhe, 2009, S. 121
- [8] Batdorf, S. B., Heinisch, H. L., Weakest Link Theory Reformulated for Arbitrary Fracture Criterion, Journal of the American Ceramic Society 61 (1978), S. 355–358
- [9] Kraft, T., Riedel, H., Numerical simulation of solid state sintering; model and application, Journal of the European Ceramic Society (2004)
- [10] Olevsky, E., Theory of sintering: from discrete to continuum, Materials Science and Engineering: R: Reports 23.2 (1998), S. 41–100. issn: 0927796X,
- [11] Safonov, A. et al., Numerical simulation of sintering for 3D-printed ceramics via SOVS model, Ceramics International 45.15 (2019), S. 19027–19035

Autorenanschriften

Dipl. Min. Martin Witscher

WZR ceramic solutions GmbH

Lise-Meitner-Str. 1

53340 Rheinbach

Telefon: +49 2226/1698-23

E-Mail: m.witscher@wzr.cc